3　超音波による波動実験

人間の耳には聞こえない振動数 20000Hz以上の超音波のうち，波長が１㎝程度のものを用いて，干渉，ブラッグ反射などの波動現象について実験を行う。超音波の検出にオシロスコープを用いることにより，干渉縞の様子などを定量的に測定することができる。

【使用実験機器】超音波による波動実験器

§１ はじめに

波動現象は，音，光，水面波，Ｘ線などで共通に起こる現象である。しかし，その現れ方は波の種類で大きく異なる。その理由の一つに波長の違いがあげられる。例えば，ブラッグ反射は波長が原子間隔程度のＸ線でないと確認できないし，音波の干渉は波長が長いため教室程度の広さの空間でないと確認しにくい。ところが，波長が約１㎝の超音波を利用すると，実験テーブル上で様々な波動現象が実現でき，また，超音波の検出にオシロスコープを用いることにより，定量的な測定も容易に行うことができるので，生徒実験に適している。

ここで，超音波とは，人間が聞くことのできる音波（振動数が約 20～20000Hz）よりも振動数が大きな波である。音波よりも波長が短いので直進性が高く，海中での魚群探知などに利用されている。人間には聞こえないが，動物の中には聞くことができるものもいて，コウモリが絶えず超音波を発信して障害物からはねかえる反射波を感知することにより，暗闇の中でも自由に飛びまわるのはよく知られている。

ここでは，超音波の波長と音速の測定(実験Ⅰ)，複スリットによる超音波の干渉(実験Ⅱ)，ブラッグ反射の模擬実験(実験Ⅲ)を行う。

§２ 波の干渉と反射

１ 干渉

ふたつの波源Ａ,Ｂから同じ振動数の波が出ていると，波源の近くでは，ふたつの波が強め合ったり弱め合ったりする。この現象を干渉といい，波源の間隔をｄとすると，強め合う位置の条件式は，ふたつの波源からの経路差を用いて，

$$|\ell_a - \ell_b| = d\sin\theta = n\lambda \quad (n\text{は整数})$$

となる。この条件を満たす位置を結ぶと波源を焦点とする双曲線となる。また，両波源と平行に移動しながら観測すると強め合う位置と弱め合う位置が交互に現れ，これを干渉縞と呼ぶ。

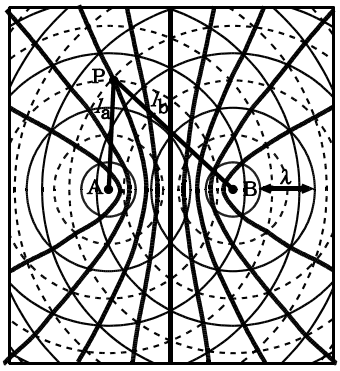

図１ 波の干渉

２ ブラッグ反射

規則正しく並んだ原子の配列にＸ線を当てると，原子の並んだ格子面で反射されたＸ線が干渉し，強め合う位置と弱め合う位置ができる。格子定数(格子の間隔)をｄとすると，強

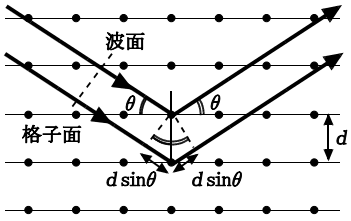

図２ ブラッグ反射

め合う位置の条件式は，X線の経路差より $2d\sin\theta = n\lambda$（nは整数）となる。

§３ 実験装置および準備

1 実験装置及び器具

・超音波による波動実験器 SSA-1

・２現象オシロスコープ

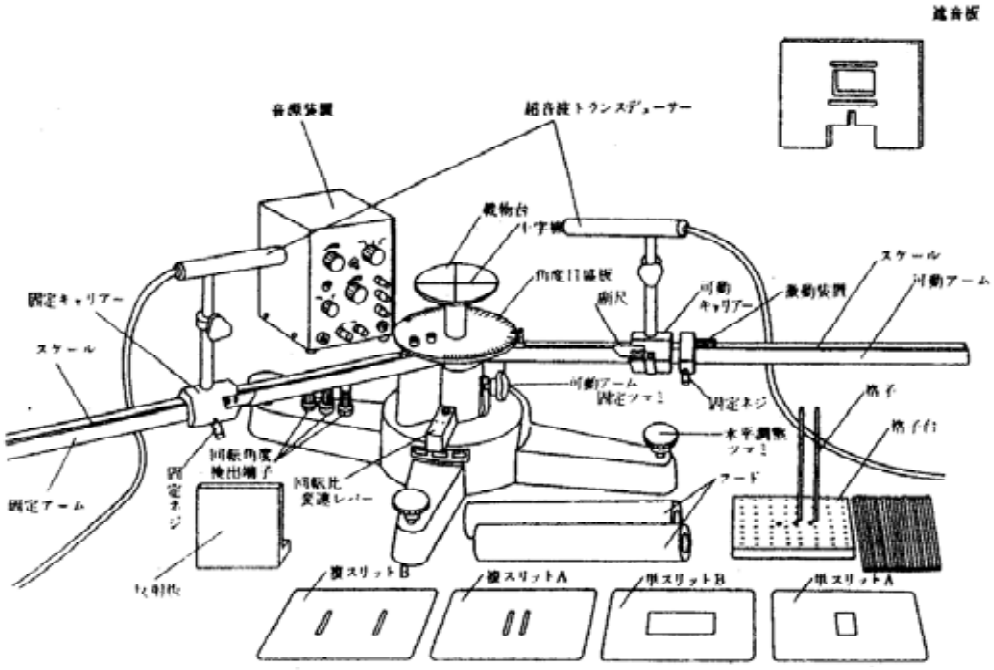

図３　全体の構成図

2 実験装置の組立と調整

①超音波の発信と受信

音源装置の超音波出力端子(OUT)と，超音波入力端子(INP)に，それぞれ超音波トランスデューサーを接続する。以下，この超音波トランスデューサーを「発音体」「受音体」と呼ぶ。

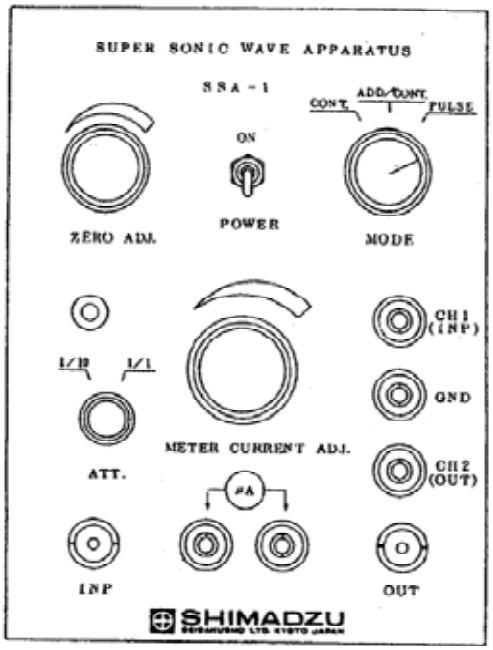

図４ 音源装置

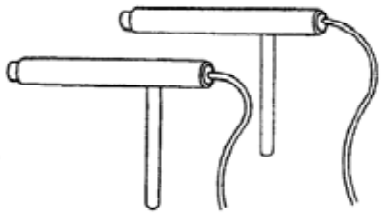

図５　超音波トランデューサー

②送信・受信した超音波の観測

２現象オシロスコープを，音源装置のオシロスコープ端子 CH1(INP)と CH2(OUT)に接続（GND端子でアース）し，超音波の波形を観測する。このとき，発音体・受音体の指向性を高めるためにフード（図６）を装着するとよい。

なお，音源装置の増幅器モード切り換えスイッチ(MODE)は，CONT(連続)にする。

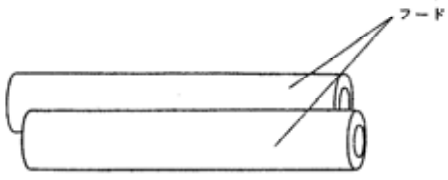

図６　フード

＊その他の端子やスイッチは，波の検出に，直流電子電圧計や，Ｘ－Ｙレコーダを利用するときのものであり，必要ならば実験機器付属の使用説明書を参照すること。

③発音体と受音体の相対位置の設定

発音体と受音体をキャリアーを通して回転支持台に設置する。キャリアーを動かすことにより両者の距離を，また，回転アームを回転させて両者の角度を変化させることができる。

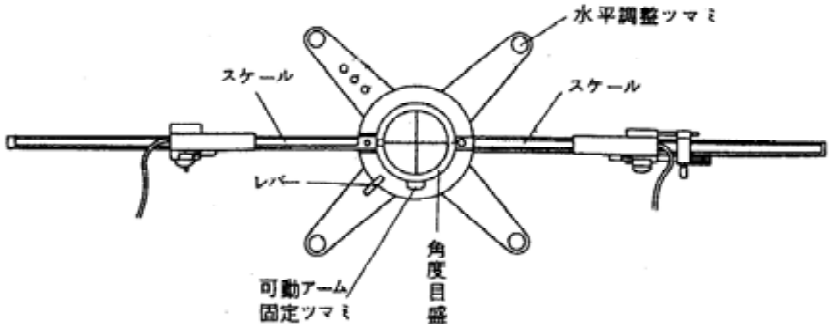

図７　回転支持台

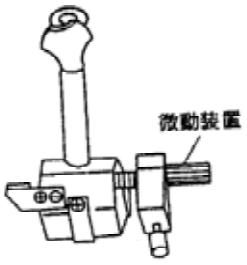

図８　キャリアー

§４ 実験Ⅰ：超音波の波長λと音速Ｖの測定

1 実験の方法

① 発音体と受音体を直線上に置き，オシロスコープの“両波の山”が一致する位置まで受音体を移動させる。このとき，キャリアーの微動装置を利用し，副尺によりキャリアーの位置χ_0を読みとる。この位置では，発信される超音波と受信される超音波の“位相”が一致しているので，両者の距離Ｌは，Ｌ＝ｎλ（ｎは整数）と表せる。

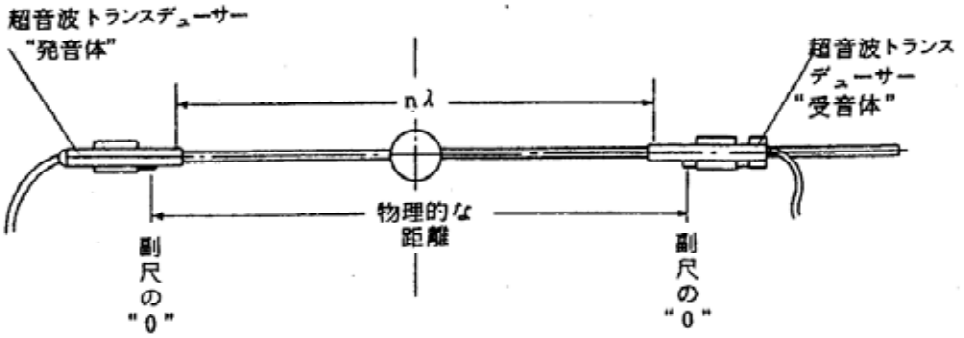

図９　実験装置

② 受音体を次第に遠ざけ，次に波形が一致したときのキャリアーの位置χ_1を読みとる。このとき，両者の距離は，初めの状態よりλだけ長くなっているので $\lambda_1=\chi_1-\chi_0$である。

③ 上の操作を続け，χ_2，χ_3・・・を読みとり，その差から，λを求める。

④ 発音体のオシロスコープの波形の横軸から周期Ｔを読み取ることができる。Ｖ＝λ/Ｔより，音速Ｖが求められる。

2 実験結果と分析

表１　発信・受信波の位相が一致する受音体の位置(測定例)

位置	χ_0	χ_1	χ_2	χ_3	χ_4	χ_5	χ_6	χ_7
[mm]	183.8	192.3	201.2	209.7	218.1	226.6	235.1	243.9

測定値より，超音波の波長λを求める。

$\lambda_1=\chi_1-\chi_0$

$\lambda_2=\chi_2-\chi_1$

…

$\lambda_7=\chi_7-\chi_6$　　以上より，λの平均値を求めることができる。

【注意】 上の式を辺々足すと，$7\times\lambda=\chi_7-\chi_0$ より，λ＝ 8.59[mm] となるが，χ_1～χ_6が消えてしまい，χ_1～χ_6の測定値の意味がなくなってしまう。

これを解消する計算方法は，以下の通りである。

$\chi_4-\chi_0=4\lambda=34.3$[mm]

$\chi_5-\chi_1=4\lambda=34.3$

$\chi_6-\chi_2=4\lambda=33.9$

$\chi_7-\chi_3=4\lambda=34.2$

辺々足して　$16\lambda=136.7$　　故に　$\lambda=8.54$[mm]

次に，オシロスコープの横軸より，周期Ｔを読みとり，速度を求める。

測定例　Ｔ＝ 24.5[μs]　　故に　Ｖ＝λ/Ｔ＝ 348[m/s]

測定時の室温が，約 25℃であったことから，音速の公式　Ｖ＝ 331.5＋0.6ｔ より，Ｖ＝ 346.5[m/s]となり，ほぼ等しい値が得られている。

§５ 実験Ⅱ：複スリットによる「超音波の干渉」

１ 実験の方法

① 発音体と直交するように，遮音板を回転支持台の中央に設置する（スタンド２台を用いる）。複スリットＡ（スリット間隔　ｄ＝ 20㎜）を遮音板の中央にセットする。このとき，位置決めのために「赤マーク」を利用する。

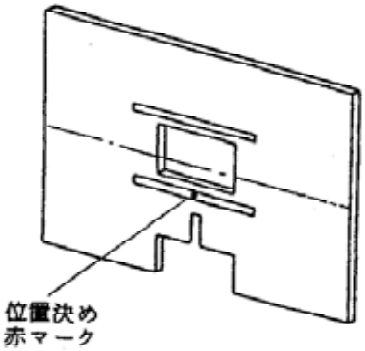

図10　遮音板

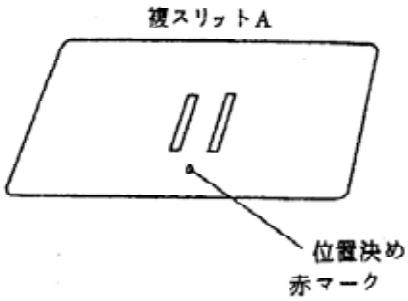

図11　複スリット

② 回転アームを 0°に固定し，受信された超音波の強さを，オシロスコープの波形の高さから読みとる。

③ 回転アームを 5°ずつ回転させ，それぞれの場合で波高を読みとり，「波の強さ」－角度θのグラフを作る。

④ グラフより，干渉で波が強め合う角度を読みとり，強め合う条件式　ｄsinθ＝ｎλ　が成り立っていることを確認する。

２ 実験結果と分析

・スリット間隔　ｄ＝20㎜

表２　　受音体の角度θと，受信波の強さ(測定例)

角度θ[度]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
波の強さ[×20mV]	3.4	3.1	2.1	0.8	3.3	4.1	2.6	1.6	0.7	1.8	2.7

角度θ[度]	55	60	65	70	75
波の強さ[×20mV]	3.4	3.1	2.8	2.2	1.9

理論値を求める。

ｄsinθ＝ｎλ　より　　sinθ＝ｎλ/ｄ

$\sin\theta_1 = 1 \times 8.54/20 = 0.427$　　$\theta_1 = 25.3^\circ$

$\sin\theta_2 = 2 \times 8.54/20 = 0.854$　　$\theta_2 = 58.6^\circ$

測定値のグラフ（図13）と比較すると，ほぼ等しい値が得られている。

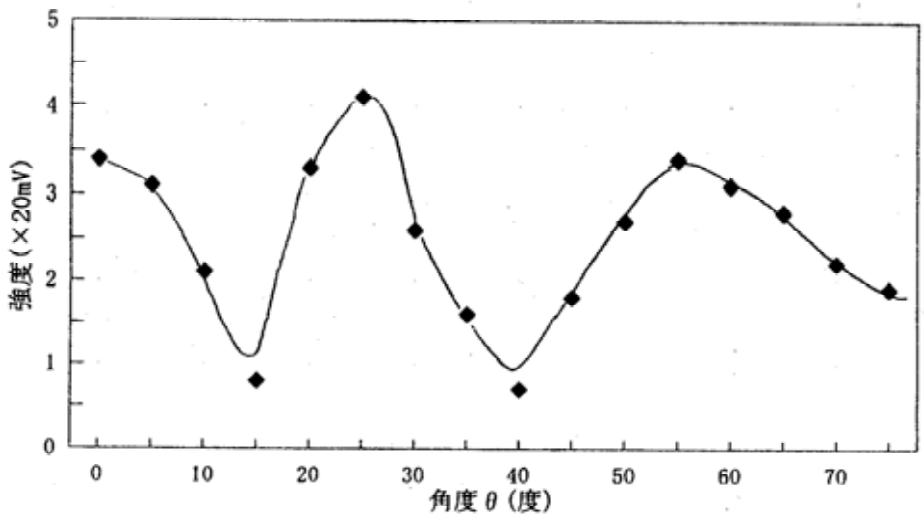

図12　複スリットによる干渉

＜考察＞

スリット間隔ｄを大きくすると，θ_1，θ_2 はどのように変化するか。

§６ 実験III：ブラッグ反射の模擬実験

1 実験の方法

① ステンレス棒を格子台に立て，結晶格子に見立てる。具体例として，３列(24本)の場合について実験する。このとき，格子間隔ｄ＝ 15㎜である。戴物台を 0°に合わせて回転支持台にセットし，格子台をのせる。このとき，戴物台の十字線が格子台の穴から見えるようにして，軸を合わせる。

図13　搭載台

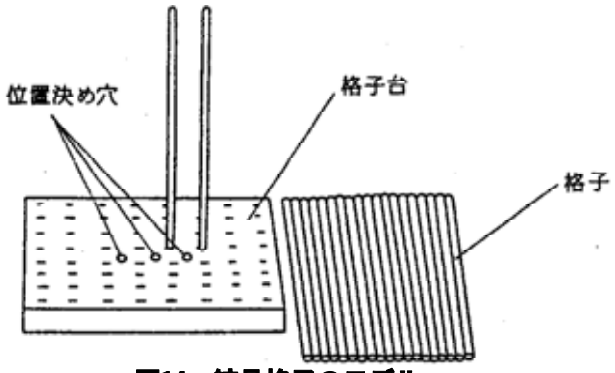

図14　結晶格子のモデル

② 回転アームの回転比を 2:1 にし，回転アームを 0°に固定し，受信された超音波の強さを，オシロスコープの波形の高さから読みとる。

③ 回転アームを回転させ 5°に固定する。このとき，回転アームの回転比を　2:1 にしているためブラッグの入射角は 2.5°となり，常に同じ格子面での反射を実験することができる。②と同様にオシロスコープの波高を読みとる。さらに，角度を 5°ずつ変化させて同様の読みとりをし，「波の強さ」－入射角θ のグラフを作る。

④ グラフより，波が強め合う入射角を読みとり，ブラッグ反射の条件式 $2d\sin\theta = n\lambda$ が成り立っていることを確認する。

2 実験結果と分析

・格子定数 d＝15㎜

表３　入射角θと，受信波の強さ(測定値)

入射角θ[度]	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
波の強さ[×20mV]	3.5	3.1	2.8	3.6	5.0	5.3	5.7	2.5	3.0	2.9	1.1

入射角θ[度]	27.5	30	32.5	35	37.5	40	42.5	45
波の強さ[×20mV]	0.6	2.4	3.7	3.3	0.8	2.3	2.1	2.2

理論値を求める。

$2d\sin\theta = n\lambda$　より　　$\sin\theta = n\lambda/(2d)$

$\sin\theta_1 = 1\times 8.54/(2\times 15)$　　$\theta_1 = 16.5^\circ$

$\sin\theta_2 = 2\times 8.54/(2\times 15)$　　$\theta_2 = 34.7^\circ$

測定値のグラフ（図15）と比較すると，ほぼ等しい値が得られている。

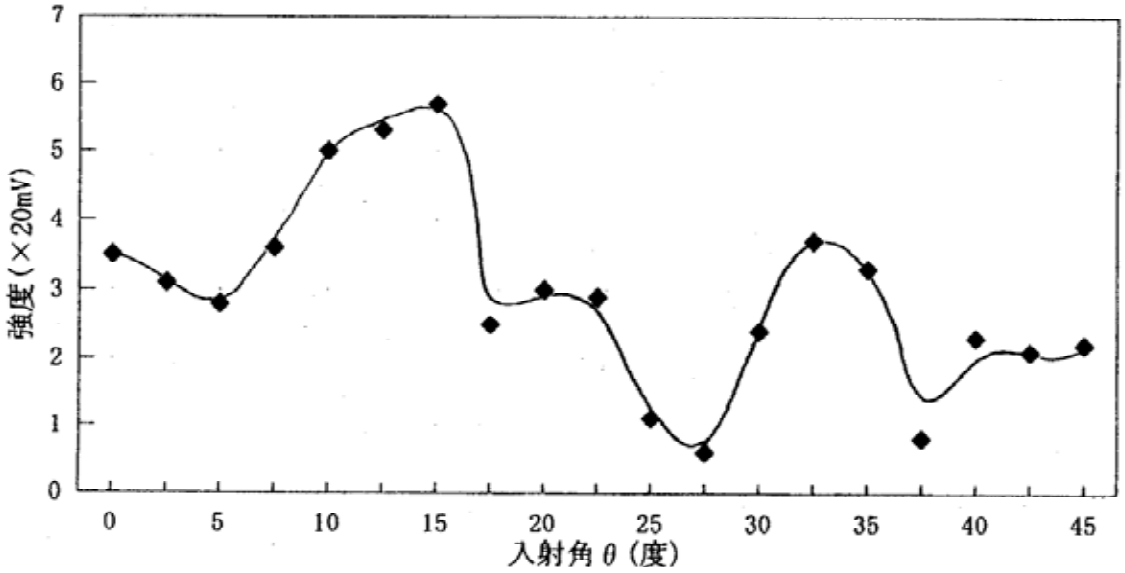

図15　ブラッグ反射

＜考察＞

格子定数dを大きくすると，θ_1，θ_2 はどのように変化するか。

【参考文献】

[1]「超音波による波動実験機SSA-1形」取扱説明書（島津理化器械(株)）

[2] 高等学校「物理ⅠB」「物理Ⅱ」（第一学習社）